ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО ПОКРЫТИЯ НАД ТРИБУНАМИ СТАДИОНА С БОЛЬШИМ ВЫРЕЗОМ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ «ДОНБАСС АРЕНА»

В.Ф. Мушчанов, А.М. Югов, А.Б. Бондарев*

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА),

86123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2;

**Рудник имени Матросова, 685000, Магадан, ул. Пролетарская, д. 12*

АННОТАЦИЯ. Данная статья посвящена определению и исследованию возможных геометрических отклонений в большепролетном покрытии над трибунами стадиона с большим вырезом на эллиптическом плане «Донбасс Арена», расположенного в г. Донецке. Выполнен обзор ранее выполненных исследований в области геометрических отклонений, монтажных нагрузок и других особенностей, возникающих при проектировании, изготовлении, возведении и эксплуатации металлических конструкций большепролетных покрытий. Определение и анализ сборочных отклонений, возникающих при сборке блока покрытия стадиона, выполнен с помощью авторской компьютерной программы «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» (ВК РАСК). В результате расчетов и исследований получены значения геометрических отклонений, возникающих при укрупнительной сборке блока покрытия перед подъемом. Проанализированы мероприятия, предусмотренные в проекте компании «MERO», для компенсации сборочных отклонений и нагрузок в покрытии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: большепролетные металлические пространственные покрытия, монтажные воздействия, сборочные отклонения, геометрическое моделирование, теория управления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мушчанов В.Ф., Югов А.М., Бондарев А.Б. Исследование геометрических отклонений при возведении большепролетного покрытия над трибунами стадиона с большим вырезом на эллиптическом плане «Донбасс Арена» // Вестник МГСУ. 2017. Том. 12. Вып. 7 (106). С. 761–773. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.761-773

STUDY OF GEOMETRIC DEVIATIONS OF THE LARGE-SPAN SHELL OVER STADIUM STANDS WITH A LARGE NOTCH ON THE ELLIPTICAL PLAN OF DONBAS ARENA

V.F. Mushchanov, A.M. Yugov*, A.B. Bondarev

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA),

2 Derzhavin str., Makeevka, 86123, Donetsk People's Republic;

**JSC «Matrosov Mine» 12 Proletarskaya str., Magadan, 685000, Russia Federation*

ABSTRACT. The present article is concerned with determination and research of probable geometric deviations of the large-span shell covering stadium stands with a large notch on the elliptical plan of Donbas Arena in town of Donetsk. The authors implemented a review of previous studies in the field of geometric deviations, erection loads, and other specific factors arising in the process of design → manufacturing → erection → service of steel structures of large-span shells. Determination and analysis of erection and assembly deviations arising during erection of stadium shell unit is done by means of author's software application – Computing System 'Dimensional Analysis of Lattice Structures' (VK RASK). The results of analysis and studies show that the amounts of geometric deviations arising during assembly of shell unit before elevation have been estimated. The authors analysed measures provided by the project of MERO enterprise for compensation of erection and assembly deviations and loads in the roof.

KEY WORDS: large-span steel spatial shells, erection effects, erection and assembly deviations, geometric model analysis, optimal control theory

FOR CITATION: Mushchanov V.F., Yugov A.M., Bondarev A.B. Issledovanie geometricheskikh otkloneniy pri vozvedenii bol'sheproletnogo pokrytiya nad tribunami stadiona s bol'shim vyrezom na ellipticheskom plane «Donbass Arena» [Study of Geometric Deviations of the Large-Span Shell Over Stadium Stands with a Large Notch on the Elliptical Plan of Donbas Arena]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 7 (106), pp. 761–773. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.761-773

Неучет точности изготовления и монтажа конструкций при проектировании может привести к непредвиденным трудовым и финансовым

затратам, не учтенным в общей стоимости строительного объекта. Накопление отклонений может привести к аварии покрытия или снижению его

живучести. Поэтому учет точности изготовления и монтажа большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий — актуальная задача для строительной отрасли; вопросы, связанные с учетом отклонений в металлических конструкциях при их проектировании, тоже актуальны [1–3].

Данная статья посвящена определению и исследованию отклонений в большепролетном покрытии над трибунами стадиона «Донбасс Арена».

В области строительства к настоящему времени появилось множество работ, посвященных изучению поведения конструкций зданий или сооружений под влиянием геометрических отклонений и монтажных воздействий [4]. Определением рациональных параметров покрытий, а также учетом ряда других особенностей работы большепролетных покрытий (деформации основания, мониторинг состояния покрытия при эксплуатации, концентрация напряжений в узлах покрытия) занимается В.Ф. Муцанов и его школа [5]. Известно, что накопление отклонений и неучет деформаций и дефектов монтажа может привести к аварии покрытия [6]. Аварии и обрушения, произошедшие за последние годы, свидетельствуют также о том, что неточности изготовления и монтажа являлись как сопутствующими, так и побуждаемыми причинами аварий. Краткий перечень аварий, произошедших за последние три десятилетия со средней периодичностью раз в два-три года, велик: потеря устойчивости одной из колонн привела к обрушению железобетонной оболочки аквапарка «Трансвааль-парк» (2004 г., Москва); рухнуло покрытие Бауманского рынка (2006 г., Москва); обрушилась половина покрытия несданного стадиона (2009 г., Гонг Бадак, Малайзия) [7].

Для борьбы с отклонениями в большепролетных шарнирно-стержневых покрытиях авторы предлагают способы устранения отклонений в шарнирно-стержневых металлических покрытиях. В результате проведенных исследований разработаны компьютерная программа для расчета точности, учитывающая как отклонения длин стержней, так и эллиптичность отверстий, методика определения монтажного напряженно-деформированного состояния (МНДС) и система конструктивно-технологической компенсации отклонений для большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, которые были апробированы на реальных объектах строительства [8–10]. В.Г. Колесниченко, А.М. Югов и С.В. Колесниченко в своих работах приводят примеры определения МНДС строительных металлоконструкций [11].

Для расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических конструкций впервые В.А. Савельев совместно с Е.В. Лебедем в ЦНИИПСК им. М.П. Мельникова на основе аналогичных геометрических процедур, которые известны в геодезии, разработали методику определения

геометрических отклонений пространственных металлических конструкций в вероятностной постановке как численной имитации на компьютере процесса их сборки и монтажа с использованием метода Монте-Карло, а также реализовали указанную методику в разработанных Е.В. Лебедем программах GENES, SBORKA и MONTAG [12, 13].

В.А. Савельев и Е.В. Лебедь использовали программу MONTAG при корректировке проекта главного корпуса ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина в г. Истра Московской области по варианту «Цилиндр» [14–16]. Е.В. Лебедь совместно с А.А. Григоряном в настоящее время занимаются исследованием отклонений в металлических купольных покрытиях, вызванных неточностями изготовления и монтажа [17, 18]. Геометрические процедуры, которые используются в программах GENES, SBORKA, MONTAG, аналогичны тем, что применяются при геодезических построениях (разбивке земельных участков) и реализованы, например, в таких программных комплексах, как Micro Survey, Autodesk Civil 3D, GEOZEM, Objectland.

Учитывая вероятностный характер возможной действительной геометрической формы покрытия, под расчетом точности понимают его однократное численное возведение до полной готовности. В качестве исследуемого сооружения рассматриваем большепролетное покрытие над трибунами стадиона с большим вырезом на эллиптическом плане. Для расчета точности принимаем блок покрытия Б1 (рис. 2).

В конструктивном отношении основными несущими элементами стадиона являются многоэтажные радиальные рамы, воспринимающие нагрузку от наклонных террас для зрительских мест, межэтажных перекрытий и встроенных помещений под трибунами. По периметру конструкции стадиона разделены деформационными швами на отдельные отсеки. Проект железобетонных конструкций секторов трибун стадиона разработан компанией «ENKA Construction & Industry Co., Inc», являющейся также генеральным подрядчиком строительства объекта. Расчет и проектирование металлоконструкций структурного покрытия стадиона выполнены компанией «Меро» с последующим их изготовлением. Запроектированное компанией «Меро» покрытие представляет собой независимо работающие секторы в виде восьми трапециевидных блоков структурных покрытий положительной кривизны с узлами типа «Меро» и с переменными размерами оснований 57 277–61 581 × 32 956–34 546 мм, из стали S355, аналога отечественной С345, изготовленные компанией «Cimitas» (Турция). Для исключения влияния возможных осадок крепление трапециевидных блоков структурных покрытий к консольным фермам с одной стороны выполнено в виде неподвижного шарнира, а с другой — в виде шарнирно-подвиж-

ной опоры, регулируемой по высоте. Принятая схема монтажа покрытия предполагает полную независимость друг от друга устанавливаемых блоков покрытия: консольных ферм и структурных плит.

Точность возведения пространственных блоков не зависит от точности монтажа блоков между

собой, т.е. блоки монтируются и работают как отдельные секторы. Поэтому для расчета точности покрытия «Донбасс Арены» достаточно провести моделирование монтажа одной из структурных плит покрытия Б1, устанавливаемых между консольными фермами К1. Номинальная геометрическая форма блока покрытия Б1 в сечениях 1–1, 2–2,

Рис. 1. Схема расположения блоков покрытия

Рис. 2. Схема блока Б1 с указанием сечений 1–1...3–3

3–3 дана на рис. 3–5. Для анализа принят блок Б1. Блок Б1 насчитывает наибольшее количество элементов и узлов. Известно, что суммарные погрешности возрастают при увеличении количества элементов (звеньев) цепи.

Погрешности в положении узлов покрытия оценивались по их отклонениям от номинала в нормальном (тангенциальном) δn (dX), меридиональном δm (dY) и радиальном δR (dZ) направлениях. Статистическая оценка погрешностей производилась на основе нескольких серий испытаний по 1000 в каждой, которые отличались друг от друга классом точности изготовления и способом монтажа.

Полученные в результате расчета точности значения отклонений основных и второстепенных узлов после корректировки положения элементов показаны на рис. 6–14 для сечений 1–1, 2–2, 3–3 в виде эпюр отклонений. На первом этапе исследовались отклонения покрытия, полученные на основании расчетов с помощью ВК Раск с учетом допусков согласно стандарту «Мега». Допускаемые отклонения расчетных геометрических параметров приняты согласно СП 16.13330.2011¹ и в соответ-

ствии со стандартом «Мега» и ГОСТ 21779-82² — по 1-му и 2-му классам точности для линейных размеров конструкций. Оценка возможных погрешностей при возведении покрытия производилась по заранее выбранным узлам, которые будем называть расчетными. Для отклонений в качестве расчетных узлов приняты цепочки узлов поясов блоков, расположенные в плоскости XYZ. При этом одна из цепочек условно названа основной — верхний пояс, а другая второстепенной — нижний пояс. Корректировка положения элементов (узлов) приводит к снижению отклонений в направлении корректировки до незначительного уровня и оказывает разнообразное влияние на отклонения в других направлениях. В таблице даны значения отклонений отдельных узлов покрытия при продольной сборке с учетом точности изготовления отдельных элементов — стержней по 1-му и 2-му классу точности и т.д. Отклонения узлов при монтаже сооружения без корректировки и с учетом корректировки положения узлов по характеру распределения согласуются с нормальным законом распределения.

² ГОСТ 21779-82. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски

Рис. 3. Схема блока покрытия в сечении 1–1

Рис. 4. Схема блока покрытия в сечении 2–2

Рис. 5. Схема блока покрытия в сечении 3–3

Рис. 6. Среднеквадратичные меридиональные dX отклонения покрытия, мм, для сечения 1–1:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 7. Среднеквадратичные меридиональные dY отклонения покрытия, мм, для сечения 1–1:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 8. Среднеквадратичные радиальные dZ отклонения покрытия, мм, для сечения 1–1:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 9. Среднеквадратичные тангенциальные dX отклонения покрытия, мм, сечение 2–2:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 10. Среднеквадратичные меридиональные dY отклонения покрытия, мм, для сечения 2–2:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 11. Среднеквадратичные радиальные dZ отклонения покрытия, мм, для сечения 2–2:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 12. Среднеквадратичные тангенциальные dX отклонения покрытия, мм, сечение 3–3:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 13. Среднеквадратичные меридиональные dU отклонения покрытия, мм, для сечения 2–2:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу

Рис. 14. Среднеквадратичные радиальные dZ отклонения покрытия, мм, для сечения 3–3:
а — по верхнему поясу; б — по нижнему поясу.

Из эпюр отклонений видно, что корректировка положения элементов покрытия при монтаже приводит к снижению узловых отклонений. Наиболее значительному увеличению подвержены отклонения узлов в тангенциальном и меридиональном, а в меньшей степени — в нормальном направлении.

По эпюрам отклонений видно, что введение корректировки положения элементов покрытия при монтаже приводит к снижению погрешностей в узлах.

Значительному увеличению подвержены отклонения узлов в тангенциальном и меридиональном, а в меньшей степени — в нормальном направ-

лении. Наибольшие отклонения имеют консольные узлы покрытия, что обусловлено накоплением погрешностей при выполнении сборки стержней в конструктивную форму. Наибольшие отклонения в длинах замыкающих стержней также наблюдаются в консольной части блока покрытия. Следует отметить значительные отклонения узлов 422, 429, 435 в консольной части покрытия по сравнению с данными для других узлов. Для объяснения этого факта в таблице приведена сравнительная информация о предельных величинах отклонений узлов покрытия и замыкающих стержнях.

Предельные отклонения при сборке покрытия без корректировки, мм

Узел	СКО dX	СКО dY	СКО dZ	Стержень	Линейное отклонение
<i>Изготовление согласно стандарту «Меро» (консоль)</i>					
423	60,22	19,85	296,91	1546	325,40
408	27,15	321,01	107,87	1436	338,72
212	50,74	53,96	318,53	1326	340,52
<i>Изготовление согласно стандарту «Меро» (опоры)</i>					
246	8,19	2,11	13,68	254	2,95
247	6,70	1,93	10,77	250	3,02
248	5,28	1,79	8,16	246	3,13
<i>Изготовление согласно стандарту «Меро» с учетом корректировки (консоль)</i>					
423	6,38	1,77	31,31	1546	35,11
408	2,88	34,83	11,02	1436	36,21
212	5,32	5,25	33,68	1326	36,25
<i>Изготовление согласно стандарту «Меро» с учетом корректировки (опоры)</i>					
246	0,84	0,20	1,40	254	0,29
247	0,66	0,19	1,11	250	0,3
248	0,53	0,18	0,85	246	0,28
<i>Монтаж согласно СП 16.13330.2011 (консоль)</i>					
394	1251,25	1318,41	738,45	996	1351,08
380	936,18	1380,82	837,62	1326	1484,71
381	814,76	234,12	1343,14	1106	1413,86
<i>Монтаж согласно СП 16.13330.2011 (опоры)</i>					
246	42,26	10,30	67,76	254	15,21
247	33,77	9,38	53,48	250	15,1
248	25,84	9,06	40,92	246	15,67
<i>Изготовление согласно ГОСТ 21779-82 по 1-му классу точности (консоль)</i>					
423	70,82	23,64	349,53	1216	396,72
408	33,21	380,10	120,63	1436	403,36
212	60,12	70,29	380,35	1326	405,50
<i>Изготовление согласно ГОСТ 21779-82 по 1-му классу точности (опоры)</i>					
246	9,75	2,48	16,45	254	3,58
247	7,91	2,43	12,82	250	3,56
248	6,13	2,12	9,60	246	3,59
<i>Изготовление согласно ГОСТ 21779-82 по 2-му классу точности (консоль)</i>					
423	101,07	36,52	499,96	1216	555,69
394	46,10	528,10	180,62	1436	558,35
212	87,11	110,99	538,99	1326	565,30
<i>Изготовление согласно ГОСТ 21779-82 по 2-му классу точности (опоры)</i>					
246	13,78	3,52	23,37	254	4,81
247	11,15	3,35	18,36	250	5,29
248	8,61	3,00	13,76	246	5,39

Оценка погрешностей производилась на основе нескольких серий испытаний по 1000 в каждой, которые отличались друг от друга видом исследуемых погрешностей или вариантом монтажа сооружений. Корректировка в ВК РАСК сопоставима с регулировкой положения узлов покрытия как в системе MERO. Необходимо заметить, что результаты прогнозирования отклонений, включая режим корректировки, согласуются с результатами исследований Горохова Е.В., Мушанова В.Ф., Касимова В.Р., Назима Я.В., Кузнецова С.Г., Васылева В.Н. [22], М.И. Лобова, А.А. Анненкова, С.С. Маликова [23], а Сердюка А.П. [24]. Кроме того, результаты принципиально согласуются с данными аналогичных исследований Оржеховского А.Н. на примере пространственных покрытий над трибунами стадионов рамно-консольного типа, которые проводятся под руководством В.Ф. Мушанова [25].

Полученные в этой работе результаты актуальны и нашли свое полное подтверждение, так как согласуются с результатами исследований, проведенными ранее. Прогнозирование отклонений и НДС покрытий с учетом влияния отклонений — необходимая процедура, которая позволяет повысить надежность большепролетных покрытий.

На основании проведенных исследований и полученных результатов можно сделать выводы:

1. Разработанный алгоритм расчета точности большепролетных металлических покрытий, реализованный в виде ВК РАСК, позволяет исследовать возможные геометрические отклонения большепролетных металлических покрытий различных

конструктивных схем и способов возведения. В результате расчета точности большепролетного покрытия стадиона «Донбасс Арена» построены эпюры среднеквадратических значений возможных отклонений по нормальному, тангенциальному и меридиональному направлениям.

2. В случае исходного варианта монтажа предельное возможное значение нормального отклонения в 408-м узле покрытия достигает 321 мм (dY), тангенциального в 423-м узле покрытия — 60,2 мм (dX), а радиального отклонения в 212-м узле покрытия — 318,5 мм (dZ). Возможное предельное отклонение в замыкающем стержне покрытия 1326 достигает 340 мм без учета корректировки положения элементов.

3. Наличие возможности корректировки положения элементов (узлов) покрытия позволяет снизить величины отклонений в 7–10 раз и привести их значения к нормативным величинам и согласуется с результатами геодезического мониторинга, проведенного сотрудниками Донбасской национальной академии строительства и архитектуры и ДП «Донецкий ПромстройНИИпроект» [23–25].

4. Наличие сборочных усилий в покрытии не приводит к снижению живучести, так как введение режима корректировки положения элементов на монтажном месте снижает не только погрешности монтажа, но и значения сборочных усилий. Более подробный анализ основных результатов по оценке влияния сборочных отклонений на НДС покрытия стадиона «Донбасс Арена» будет представлен в дальнейших публикациях авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев В.А. Теоретические основы проектирования металлических куполов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1995. 40 с.
2. Лебедь Е.В. Прогнозирование погрешностей возведения большепролетных металлических куполов на основе геометрического моделирования их монтажа : дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 171 с.
3. Бондарев А.Б., Югов А.М. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4 (56). С. 28–37.
4. Пат. № 79680 Украина, МПК E04B 1/32; E04B 1/58. Способ монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий / А.Б. Бондарев, А.М. Югов ; заяв. и патентообл. Бондарев А.Б., Югов А.М.; заявл. № u 2012 13187; 19.11.2012; опубл. 25.04.2013; бюл. № 1.
5. Пат. № 79683 Украина, МПК E04B 1/38; E04B 1/58. Стыковое соединение стержней с разными размерами поперечного сечения / А.Б. Бондарев, А.М. Югов; заяв. и патентообл. Бондарев А.Б., Югов А.М.; заявл. № u 2012 13191; 19.11.2012; опубл. 25.04.2013; бюл. № 1.
6. Пат. № 80327 Украина, МПК E04B 1/38; E04B 1/58. Стыковое соединение стержней с равными размерами поперечного сечения / А.Б. Бондарев, А.М. Югов; заяв. и патентообл. Бондарев А.Б., Югов А.М. ; заявл. № u 2012 13193; 19.11.2012; опубл. 25.04.2013; бюл. № 1.
7. Абовский Н.П. Управляемые конструкции. Красноярск, 1998. 433 с.
8. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк» // ANSYS Solutions. Русская редакция. 2007. № 4. С. 5–12.
9. Молев И.В. Конструктивные разработки, экспериментально-теоретические исследования и внедрение стальных куполов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 1998. 36 с.
10. Chilton J. Space grid structures. Architectural Press, 2000. 180 p.
11. Савельев В.А., Лебедь Е.В. Математическое моделирование на ЭВМ процесса возведения пространственных сооружений. М., 1989. 37 с. Библиогр.: С. 36–37. Деп. во ВНИИТПИ 23.12.88, № 9811
12. Савельев В.А., Лебедь Е.В. Численное моделирование действительной формы консольной составной конструкции. М., 1988. 24 с. Деп. в ВНИИИС 09.07.87, № 8102.
13. Лебедь Е.В. Оценка точности вычисления среднеквадратического отклонения случайной величины. М., 1991. 5 с. Деп. в ВИНТИ 23.12.91, № 437. В91.
14. Лебедь Е.В., Шебалина О.В. Оценка возможных отклонений от идеальной геометрической формы при

сборке составных конструкций // Монтажные и специальные строительные работы. Изготовление металлических и монтажных строительных конструкций : информ. сб. ЦБНТИ. 1992. № 1. С. 1–6.

15. Лебедев Е.В., Шебалина О.В. К расчету точности сборки составной конструкции // Промышленное и гражданское строительство. 1993. № 9. С. 27–28.

16. Лебедев Е.В., Шебалина О.В. Анализ искажений геометрической формы при сборке составных металлических конструкций // Промышленное строительство. 1992. № 5. С. 23–24.

17. Савельев В.А., Лебедев Е.В., Шебалина О.В. Математическое моделирование монтажа пространственных конструкций // Промышленное строительство. 1991. № 1. С. 18–20.

18. Лебедев Е.В. Численное исследование погрешностей возведения большепролетных металлических куполов на ЭВМ // Совершенствование конструктивных решений и методов расчета строительных конструкций : межвуз. науч. сб. / под ред. К.Ф. Шагивалеева. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. С. 45–52.

19. Лебедев Е.В. Геометрический расчет каркасов пространственных сооружений. Саратов : СГТУ, 2001. 40 с.

20. Лебедев Е.В. Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2003. Вып. 3 (9). С. 81–86.

21. Лебедев Е.В. Прогнозирование погрешностей возведения каркаса большепролетного 8-ярусного ребристого купола // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Технические науки. 2003. Вып. 2–3 (8). С. 11–17.

22. Лебедев Е.В. Точность возведения стержневых пространственных металлических покрытий и ее прогнозирование // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2013. № 4. С. 5–12.

23. Лебедев Е.В. Компьютерное моделирование точности возведения двухъярусных металлических куполов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 89–92.

24. Лебедев Е.В., Етеревский В.А. Начальные усилия в стержнях односетчатого купола из-за несовершенства его формы при полносборной установке // Вестник МГСУ. 2011. Т. 2. № 2. С. 137–144.

25. Лебедев Е.В., Етеревский В.А. Анализ начальных усилий секторально-сетчатого купола при полносборной установке в сравнении со звездчатым куполом // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2012. № 4. С. 91–98.

26. Лебедев Е.В., Григорян А.А. Начальные усилия в двухъярусных металлических куполах из-за погрешностей изготовления и монтажа их конструкций // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 69–79.

27. Лебедев Е.В., Григорян А.А. Влияние монтажных расчетных схем ребер двухъярусного металлического купола на начальные усилия при устранении погрешностей // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 66–79.

28. Лебедев Е.В., Григорян А.А. Исследование начальных усилий в двухъярусном металлическом куполе при устранении кольцевых погрешностей монтажа // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 36–51.

29. Gaul L., Albrecht H., Wirtzner J. Semi-active friction damping of large space truss structures // Shock and Vibration. 2004. Vol. 11. Pp. 173–186.

30. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. Push-over analysis for performance-based seismic design // Computers and Structures 2002. No. 80. Pp. 2483–2493.

31. Farrar C.R., Worden K., Michael T.D. et al. Impacts of artificial intelligence and optimisation on design, construction and maintenance. Los Alamos : Los Alamos National Laboratory, 2007. 143 p.

32. Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia Study on the accuracy of response spectrum method for long-span reticulated shells // International Journal of Space Structures. 2009. Vol. 24. No. 1. Pp. 27–35.

33. Kaouk M., Zimmerman D. Structural damage assessment using a generalized minimum rank perturbation theory // Proceedings of the 34th American Institute of Aeronautics and Astronautics Structural Dynamics and Material Conference. La Jolla, 1993. Pp. 1529–1538.

34. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures // International Journal of Space Structures. 2009. Vol. 24. No. 1. Pp. 13–26.

35. Kohtaro Matsumoto, Wakabayashi Sachiko, Noumi Masahiro et al. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII // Proceedings of the 16th International Association for Automation and Robotics in Construction Conference, Madrid, Spain. 1999. Pp. 225–230.

36. Keleşoğlu Ö., Ülker M. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 2005. Vol. 80. No. 5. Pp. 321–329.

37. Ogunfunmi T. Adaptive Nonlinear System Identification : The Volterra and Wiener Model Approaches. Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 229 p.

38. Tsou P., Shen M.-H. Structural damage detection and identification using neural networks // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 1994. Vol. 32. No. 1. Pp. 176–183.

39. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses // Electronic Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35.

40. Makoto Ohsaki, Zhang Jingyao. Stability conditions of prestressed pin-jointed structures // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2006. Vol. 41. Pp. 1109–1117.

41. Makowski Z.S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures // Proceedings of the International Symposium. Warsaw : Poland, 2002. Pp. 17–41.

42. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System // Journal of Optical Society America. 1977. No. 67. Pp. 360–369.

43. А.с. СССР 990983, МПК E04B1/58. Стыковое соединение растянутого пояса металлической фермы / Г.Н. Беккер; заяв.: Ордена Трудового Красного Знамени Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций «ЦНИИпроект-стальконструкция»; № 3306912/29-33, заяв. 26.05.1981; опублик. 23.01.1983, бюл. № 3.

44. Патент РФ № 2429329, МПК E04B 1/58 (2006.01). Сварное стыковое соединение трубчатых стержней / А.С. Марутян, Т.Л. Кобаля, Ю.И. Павленко; патенто-обл. А.С. Марутян; № 2010109472/03, заяв. 12.03.2010; опублик. 20.09.2011, бюл. № 26.

45. Кудишин Ю.И. Металлические конструкции. М. : Академия, 2007. 688 с.

46. Патент РФ № 282266, МПК F16L 13/00 (2006.01) E04B 1/58 (2006.01). Способ изготовления узла соединения труб разного диаметра / И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов; патентообл. Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ); № 2008143802/06, заяв. 05.11.2008; опубл. 20.02.2010; бюл. № 5.

47. Патент на изобретение № 2337268, МПК F16L 13/00 (2006.01) E04B 1/58 (2006.01). Способ соединения труб разного диаметра / И.Л. Кузнецов, А.В. Исаев, Л.С. Сабитов; патентообл. Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ); № 2007112742/06, заяв. 28.03.2007; опубл. 27.10.2008; бюл. № 30.

48. Патент на изобретение № 2099481, МПК E04B 1/32 (1995.01) E04B 1/58 (1995.01). Анкерная деталь для

крепления арок из однотипных секций к фундаменту / И.Л. Кузнецов, Д.М. Хусаинов; заяв. и патентообл. Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ); № 95100094/03, заяв. 04.01.1995; опубл. 20.12.1997.

49. Заявка на изобретение № 2099480 МПК E04B 1/32 (1995.01). Способ монтажа арок / И.Л. Кузнецов, Д.М. Хусаинов; заяв. и патентообл. Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ); № 94040128/33, заяв. 20.12.1997; опубл. 27.10.1994.

50. Хусаинов Д.М. Повышение качества проектирования изготовления и монтажа каркасных облегченных арок зданий : дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1996. 252 с.

Поступила в редакцию в декабре 2016 г.

Принята в доработанном виде в марте 2017 г.

Одобрена для публикации в апреле 2017 г.

Об авторах: **Мушанов Владимир Филиппович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА)**, 86123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2, mvf@donnasa.ru;

Югов Анатолий Михайлович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства. **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА)**, 86123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2, amyrus@mail.ru;

Бондарев Алексей Борисович — инженер по металлическим конструкциям, **Рудник им. Матросова**, 685000, Магадан, ул. Пролетарская, д. 12, bondarev_a_b_rus@mail.ru.

REFERENCES

1. Savell'ev V.A. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya metallicheskih kupolov : avtoreferat dissertatsii ... doktora tekhnicheskikh nauk* [Theoretical Foundations of Metal Cupolas : Abstract of the Thesis of Doctor of Technical Sciences]. Moscow, 1995, 40 p. (In Russian)

2. Lebed' E.V. *Prognozirovanie pogreshnostey vozvedeniya bol'sheproletnykh metallicheskih kupolov na osnove geometricheskogo modelirovaniya ikh montazha : disertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Prediction Errors in the Construction of Large-Span Metal Dome Based on Geometric Modeling of Their Installation : Abstract of the Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 1988. 171 p. (In Russian)

3. Bondarev A.B., Yugov A.M. Otsenka montazhnykh usilii v metallicheskom pokrytii s uchetom sborki [Evaluation of Installation Efforts in Metal Coatings, Allowing for Assembly Process]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2015, no. 4 (56), pp. 28–37. (In Russian)

4. Bondarev A.B., Yugov A.M. Patent No. 79680 Ukraine, IPC E04V 1/32; E04V 1/58. *Sposob montazha bol'sheproletnykh sterzhnevyykh metallicheskih pokrytiy* [Installation Method of Large-Core Metal Coatings]; applicant and patentee A.B. Bondarev, A.M. Yugov; no. u 2012 13187; stated 19.11.2012; published 25.04.2013, bulletin no. 1. (In Russian)

5. Bondarev A.B., Yugov A.M. Pat. no. 79683 Ukraine, IPC E04V 1/38; E04V 1/58. *Stykovoe soedinenie sterzhney s raznymi razmerami poperechnogo secheniya* [Butt Joint of Rods with Different Dimensions of Cross Section]; applicant

and patentee Bondarev A.B., Yugov A.M.; no. u 2012 13191; stated 19.11.2012; published 25.04.2013, bulletin no. 1. (In Russian)

6. Bondarev A.B., Yugov A.M. Pat. no. 80327 Ukraine, IPC E04V 1/38; E04V 1/58. *Stykovoe soedinenie sterzhney s ravnymi razmerami poperechnogo secheniya* [Butt Joint of Rods with Equal Dimensions of Cross Sections]; applicant and patentee Bondarev A.B., Yugov A.M.; no. u 2012 13193; stated 19.11.2012; published 25.04.2013, bulletin. no. 1. (In Russian)

7. Abovskiy N.P. *Upravlyaemye konstruksii* [Operated Constructions] Krasnoyarsk, KamKras Publ., 1998, 433 p. (In Russian)

8. Belostotskiy A.M., Dubinskiy S.I. Analiz prichin obrusheniya konstruksiy pokrytiya SOK «Transvaal'-park» [Analysis of the Causes of Collapse of the SRC «Transvaal-Park» Roof Structures]. *ANSYS Solutions. Russkaya redaktsiya* [ANSYS Solutions. Russian Edition] 2007. no. 4, pp. 5–12. (In Russian)

9. Molev I.V. *Konstruktivnye razrabotki, eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya i vnedrenie stal'nykh kupolov : avtoreferat dissertatsii ... doktora tekhnicheskikh nauk* [Design Development, Experimental and Theoretical Research and Implementation of Steel Domes : Abstract of the Thesis of Doctor of Technical Sciences]. Nizhny Novgorod, 1998, 36 p. (In Russian)

10. Chilton J. *Space Grid Structures*. Architectural Press, 2000, 180 p.

11. Savell'ev V.A., Lebed' E.V. *Matematicheskoe modelirovanie na EHVМ protsessa vozvedeniya prostranstven-*

nyh sooruzheniy [Computer Mathematic Simulation of Space Structure Erection Process]. Moscow, 1989. 37 p. Deposited in All-Union Institute of Scientific and Technical Information 23.12.88, no. 9811. (In Russian)

12. Savel'ev V.A., Lebed' E.V. *Chislennoe modelirovanie deystvitel'noy formy konsol'noy sostavnoy konstrukt-sii* [Numerical Simulation of the Real Shape of Overhanging Composite Construction]. Moscow, 1988. 24 p. Deposited in All-Union Institute of Scientific and Technical Information 09.07.87, no. 8102. (In Russian)

13. Lebed' E.V. *Otsenka tochnosti vychisleniya sred-nekvadrateskogo otkloneniya sluchaynoy velichiny* [Assessment of Accuracy of Calculation of Root-mean-square Deviation of Chance Variable]. Moscow, 1991. 5 p. P. 5. Deposited in All-Union Institute of Scientific and Technical Information 23.12.91, no. 437. V 91. (In Russian)

14. Lebed' E.V., Shebalina O.V. *Otsenka vozmozhnykh otkloneniy ot ideal'noy geometricheskoy formy pri sborke sostavnykh konstrukt-siy* [Evaluation of Possible Deviations from the Ideal Geometric Shape when Assembling Composite Structures]. *Montazhnye i spetsial'nye stroitel'nye raboty. Izgotovlenie metallicheskiykh i montazh stroitel'nykh konstrukt-siy : informatsionnyy sbornik TsBNTI* [Mounting and Special Construction Works. Manufacture of Metal Structures and Installation of Building Structures : Informational Collection of Central Office for Scientific and Technical Information]. Moscow, 1992, no. 1, pp. 1–6. (In Russian)

15. Lebed' E.V., Shebalina O.V. *K raschetu tochnosti sborki sostavnoy konstrukt-sii* [Calculation of the Accuracy of Composite Structures Assembling]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 1993, no. 9, pp. 27–28. (In Russian)

16. Lebed' E.V., Shebalina O.V. *Analiz iskazheniy geometricheskoy formy pri sborke sostavnykh metallicheskiykh konstrukt-siy* [Analysis of Distortions of the Geometric Shape in the Assembly of Composite Metal Structures]. *Promyshlennoe stroitel'stvo* [Industrial Construction]. 1992, no. 5, pp. 23–24. (In Russian)

17. Savel'ev V.A., Lebed' E.V., Shebalina O.V. *Matematicheskoe modelirovanie montazha prostranstvennykh konstrukt-siy* [Mathematical Modeling of Spatial Structures Installation]. *Promyshlennoe stroitel'stvo* [Industrial Construction]. 1991, no. 1, pp. 18–20. (In Russian)

18. Lebed' E.V. *Chislennoe issledovanie pogreshnostey vozvedeniya bol'sheproletnykh metallicheskiykh kupolov na EVM* [Numerical Investigation of Imprecision of Construction of Long Span Steel Domes in ECM]. *Sovershenstvovanie konstruktivnykh resheniy i metodov rascheta stroitel'nykh konstrukt-siy : mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik* [Advanced of Structural Concepts and Methods of Analysis of Engineering Structures: Inter-University Scientific Collection]. Saratov, Saratovskiy State Technical University, 1999, pp. 45–52. (In Russian)

19. Lebed' E.V. *Geometricheskoy raschet karkasov prostranstvennykh sooruzheniy* [Geometric Calculation of Space Structures Frame]. Saratov, Saratova State Technical University Publ., 2001, 40 p. (In Russian)

20. Lebed' E.V. *Osobennosti chislennogo modelirovaniya montazha karkasa odnosetchatogo kupola* [Particularities of Numerical Simulation of Carcassing of Single-Grid Dome]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2003, vol. 3 (9), pp. 81–86. (In Russian)

21. Lebed' E.V. *Prognozirovanie pogreshnostey vozvedeniya karkasa bol'sheproletnogo 8-yarusnogo rebristogo kupola* [Forecasting of Errors of Carcassing of Large-Span High-Rise Ribbed Dome]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Technical Science]. 2003, vol. 2–3 (8), pp. 11–17. (In Russian)

22. Lebed' E.V. *Tochnost' vozvedeniya sterzhnevnykh prostranstvennykh metallicheskiykh pokrytiy i ee prognostirovanie* [Accuracy in the Construction of Metal Space Framed Roofs and Its Prediction]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Series: Engineering Researches]. 2013, no. 4, pp. 5–12. (In Russian)

23. Lebed' E.V. *Komp'yuternoe modelirovanie tochnosti vozvedeniya dvukhpoyasnykh metallicheskiykh kupolov* [Computer Modeling of the Accuracy of Erecting Two-Layer Metal Domes]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2013, no. 12, pp. 89–92. (In Russian)

24. Lebed' E.V., Eterevskiy V.A. *Nachal'nye usiliya v sterzhnyakh odnosetchatogo kupola iz-za nesovershenstva ego formy pri polnosbornoy ustanovke* [Initial Stresses in the Bars of a One-Layer Lattice Dome Due to the Imperfections of Its Form During Installation as an Assembled Structure]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, vol. 2, no. 2, pp. 137–144. (In Russian)

25. Lebed' E.V., Eterevskiy V.A. *Analiz nachal'nykh usiliiy sektorial'no-setchatogo kupola pri polnosbornoy ustanovke v sravnenii so zvezdchatym kupolom* [Analysis of the Initial Efforts of Sector-Mesh Dome at Full Assembly Installation Compared with Stellate Dome]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Series: Engineering Researches]. 2012, no. 4, pp. 91–98. (In Russian)

26. Lebed' E.V., Grigoryan A.A. *Nachal'nye usiliya v dvukhpoyasnykh metallicheskiykh kupolakh iz-za pogreshnostey izgotovleniya i montazha ikh konstrukt-siy* [Initial Stresses in Two-Layer Metal Domes Due to Imperfections of Their Production and Assemblage]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 4, pp. 69–79. (In Russian)

27. Lebed' E.V., Grigoryan A.A. *Vliyanie montazhnykh raschetnykh skhem reber dvukhpoyasnogo metallicheskogo kupola na nachal'nye usiliya pri ustraneni pogrshnostey* [Influence of Assembly Analytical Models of the Ribs of a Double-Layer Metal Dome on the Initial forces in Case of Elimination of Imperfections]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 8, pp. 66–79. (In Russian)

28. Lebed' E.V., Grigoryan A.A. *Issledovanie nachal'nykh usiliiy v dvukhpoyasnom metallicheskom kupole pri ustraneni kol'tsevykh pogreshnostey montazha* [Study of Initial forces in a Double-Layer Metal Dome Due to Elimination of Annular Imperfections of Installation]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 4, pp. 36–51. (In Russian)

29. Gaul L., Albrecht H., Wirmitzer J. *Semi-active Friction Damping of Large Space Truss Structures*. *Shock and Vibration*. 2004, vol. 11, pp. 173–186.

30. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. *Push-over Analysis for Performance-Based Seismic Design*. *Computers and Structures* 2002, no. 80, pp. 2483–2493.

31. Farrar C.R., Worden K., Michael T.D. et al. Impacts of Artificial Intelligence and Optimisation on Design, Construction and Maintenance. Los Alamos, Los Alamos National Laboratory, 2007, 143 p.
32. Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bail Linjia Study on the Accuracy of Response Spectrum Method for Long-span Reticulated Shells. *International Journal of Space Structures*. 2009, vol. 24, no. 1, pp. 27–35.
33. Kaouk M., Zimmerman D. Structural Damage Assessment Using A Generalized Minimum Rank Perturbation Theory. *Proceedings of the 34th American Institute of Aeronautics and Astronautics Structural Dynamics and Material Conference*. La Jolla, 1993, pp. 1529–1538.
34. Kaveh A., Nouri M. Weighted Graph Products for Configuration Processing of Planar and Space Structures. *International Journal of Space Structures*. 2009, vol. 24, no. 1, pp. 13–26.
35. Kohtaro Matsumoto, Wakabayashi Sachiko, Noumi Masahiro, et al. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Proceedings of the 16th International Association for Automation and Robotics in Construction Conference, Madrid, Spain*. 1999, pp. 225–230.
36. Keleşoğlu Ö., Ülker M. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2005, vol. 80, no. 5, pp. 321–329.
37. Ogunfunmi T. *Adaptive Nonlinear System Identification. The Volterra and Wiener Model Approaches*. Springer Science+Business Media, LLC. 2007, 229 p.
38. Tsou P., Shen M.-H. Structural Damage Detection and Identification Using Neural Network. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 1994, vol. 32, no. 1, pp. 176–183.
39. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of Semi-rigid Connection on Structural Responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010, vol. 10, pp. 22–35.
40. Makoto Ohsaki, Zhang Jingyao. Stability Conditions of Prestressed Pin-Jointed Structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006, vol. 41, pp. 1109–1117.
41. Makowski Z.S. Development of Jointing Systems for Modular Prefabricated Steel Space Structures. *Proceedings of the International Symposium. Warsaw: Poland*. Warsaw, 2002, pp. 17–41.
42. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977, no. 67, pp. 360–369.
43. Bekker G.N. USSR patent 990983. IPC E04B1/58. *Stykovoe soedinenie rastyanutogo poyasa metallicheskoj fermy* [Butt Joint of the Stretched Girdle of a Metal Truss]; claimer: Orders of the Red Banner of Labor the Central Scientific Research and Design Institute of Construction Metal Structures “Tsniproektstalkonstruksiya”; no. 3306912/29-33; claim 26.05.1981; published 23.01.1983, bulletin no. 3. (In Russian)
44. Marutyan A.S., Kobaliya T.L., Pavlenko Yu.I. Patent RU no. 282266, IPC F16L 13/00 (2006.01) E04B 1/58 (2006.01) *Svarnoe stykovoe soedinenie trubchatykh sterzhney* [Welded Butt Joint of Tubular Rods]; patentholder Marutyan A.S.; no. 2010109472/03, claim 12.03.2010; published 20.09.2011, bulletin no. 26. (In Russian)
45. Kudishin Yu.I. *Metallicheskie konstruksii* [Metal Constructions]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 688 p. (In Russian)
46. Kuznetsov I.L., Sabitov L.S. Patent RU 282266, IPC F16L 13/00 (2006.01) E04B 1/58 (2006.01). *Sposob izgotovleniya uzla soedineniya trub raznogo diametra* [Method for Manufacturing Different Diameter Joining Pipes]; patentholder Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KazGASU); no. 2008143802/06, claim 05.11.2008; published 27.10.2008; bulletin no. 5. (In Russian)
47. Kuznetsov I.L., Isaev A.V., Sabitov L.S. Patent RU no. 2337268, IPC F16L 13/00 (2006.01) E04B 1/58 (2006.01). *Sposob soedineniya trub raznogo diametra* [Method for Joining Different Diameter Pipes]; patentholder Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KazGASU); no. 2007112742/06, claim 28.03.2007; published 27.10.2008; bulletin no. 30. (In Russian)
48. Kuznetsov I.L., Husainov D.M. Patent RU no. 2099481, IPC E04B 1/32 (1995.01) E04B 1/58 (1995.01). *Ankernaya detal' dlya krepleniya arok iz odnotipnykh sektsiy k fundamentu* [Anchor Detail for Fastening Arches from Homogeneous Sections to the Foundation]; patentholder Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KazGASU); no. 95100094/03, claim 04.01.1995; published 27.10.2008; bulletin no. 30. (In Russian)
49. Kuznetsov I.L., Husainov D.M. Application for a discovery no. 2099480, IPC E04B 1/32 (1995.01). *Sposob montazha arok* [Method for Arches Installation]; patentholder Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KazGASU); no. 94040128/33 claim 20.12.1997; published 27.10.1994 (In Russian)
50. Husainov D.M. *Povyshenie kachestva proektirovaniya izgotovleniya i montazha karkasnykh oblegchennykh arochnykh zdaniy : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the Quality of Design, Manufacturing and Installation of the Lightweight Frame Arch Buildings : Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Kazan, 1996, 252 p. (In Russian)

Received in December 2016.

Adopted in revised form in March 2017.

Approved for publication in April 2017.

About the authors: **Mushchanov Vladimir Fillipovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**, 2 Derzhavin str., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, mvf@donnasa.ru;

Yugov Anatoliy Mikhaylovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction, **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**, 2 Derzhavin str., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic; amyrus@mail.ru;

Bondarev Aleksey Borisovich — Engineer for Metal Structures, **JSC «Matrosov Mine»**, 12 Proletarskaya str., Magadan, 685000 Russia Federation; bondarev_a_b_rus@mail.ru.